

INSTITUT  
NATIONAL DE  
LA PROPRIÉTÉ  
INDUSTRIELLE

FR 99 / 02076

PCT/FR 99 / 02076

REC'D 13 SEP 1999

WIPO

# BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

## COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le 01 SEP. 1999

Pour le Directeur général de l'Institut  
national de la propriété industrielle  
Le Chef du Département des brevets

Martine PLANCHE

**PRIORITY DOCUMENT**  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

INSTITUT  
NATIONAL DE  
LA PROPRIÉTÉ  
INDUSTRIELLE

## SIEGE

26 bis, rue de Saint Petersburg  
75800 PARIS Cédex 08  
Téléphone : 01 53 04 53 04  
Télécopie : 01 42 93 59 30

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

**REQUÊTE EN DÉLIVRANCE**

Confirmation d'un dépôt par télécopie ☒

Cet imprimé est à remplir à l'encre noire en lettres capitales

26 bis, rue de Saint Pétersbourg

75800 Paris Cedex 08

Téléphone : (1) 42.94.52.52 Télécopie : (1) 42.93.59.30

Réserve à l'INPI

DATE DE REMISE DES PIÈCES - 4 SEP. 1998

N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL 98 11227 -

DÉPARTEMENT DE DÉPÔT

DATE DE DÉPÔT

04 SEP. 1998

I. N. P. I.  
RENNES

1 NOM ET ADRESSE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE  
À QUI LA CORRESPONDANCE DOIT ÊTRE ADRESSÉE

CABINET BALLOT-SCHMIT  
M. Yves BEAUFILS  
4 RUE GENERAL HOCHÉ  
56100 LORIENT

n° du pouvoir permanent : 014171/FR références du correspondant : 02 97 21 87 8  
téléphone : 02 97 21 87 8

2 DEMANDE Nature du titre de propriété industrielle

☒ brevet d'invention

☐ demande divisionnaire

☐ certificat d'utilité

☐ transformation d'une demande  
de brevet européen

demande initiale

☐ brevet d'invention

☐ certificat d'utilité n°

date

Établissement du rapport de recherche

☐ différé

☒ immédiat

Le demandeur, personne physique, requiert le paiement échelonné de la redevance

☐ oui

☐ non

Titre de l'invention (200 caractères maximum)

PROCEDE D'ESTIMATION DU MOUVEMENT ENTRE DEUX IMAGES.

3 DEMANDEUR (S)

n° SIREN

code APE-NAF

Nom et prénoms (souligner le nom patronymique) ou dénomination

1. FRANCE TELECOM

2. TELEDIFFUSION DE FRANCE - TDF

Forme juridique

S.A.

S.A.

Nationalité (s) 1. Française.

2. Française.

Adresse (s) complète (s)

Pays

1. 6 Place d'Alleray  
75015 PARIS

FRANCE

2. 10 rue d'Oradour sur Glane  
75015 PARIS

FRANCE

En cas d'insuffisance de place, poursuivre sur papier libre ☐

4 INVENTEUR (S) Les inventeurs sont les demandeurs

☐ oui

☒ non

Si la réponse est non, fournir une désignation séparée

5 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES

☐ requise pour la 1ère fois

☐ requise antérieurement au dépôt ; joindre copie de la décision d'admission

6 DÉCLARATION DE PRIORITÉ OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE LA DATE DE DÉPÔT D'UNE DEMANDE ANTÉRIEURE

pays d'origine

numéro

date de dépôt

nature de la demande

7 DIVISIONS

antérieures à la présente demande

n°

date

n°

date

8 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE

(nom et qualité du signataire - n° d'inscription)

SIGNATURE DU PRÉPOSÉ À LA RÉCEPTION

SIGNATURE APRES ENREGISTREMENT DE LA DEMANDE À L'INPI

Yves BEAUFILS - CPI 92-1015.



# BREVET D'INVENTION, CERTIFICAT D'UTILITE

## DÉSIGNATION DE L'INVENTEUR

(si le demandeur n'est pas l'inventeur ou l'unique inventeur)

### DIVISION ADMINISTRATIVE DES BREVETS

26bis, rue de Saint-Petersbourg  
75800 Paris Cédex 08  
Tél. : 01 53 04 53 04 - Télécopie : 01 42 93 59 30

N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL

98 M 227

### TITRE DE L'INVENTION :

PROCEDE D'ESTIMATION DU MOUVEMENT ENTRE DEUX IMAGES.

### LE(S) SOUSSIGNÉ(S)

Yves BEAUFILS  
CABINET BALLOT-SCHMIT  
4 RUE GENERAL HOCHÉ  
56100 LORIENT

DÉSIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) (indiquer nom, prénoms, adresse et souligner le nom patronymique) :

LAURENT Nathalie  
24 Square Georges Travers  
35000 RENNES

LECHAT Patrick  
9 rue Marcel Planiol  
35000 RENNES

SANSON Henri  
12 Allée des Roseaux  
35690 ACIGNE

NOTA : A titre exceptionnel, le nom de l'inventeur peut être suivi de celui de la société à laquelle il appartient (société d'appartenance) lorsque celle-ci est différente de la société déposante ou titulaire.

Date et signature (s) du (des) demandeur (s) ou du mandataire

Lorient, le 04 septembre 1998.

Yves BEAUFILS - CPI 92-1015.

PROCEDE D'ESTIMATION DU MOUVEMENT  
ENTRE DEUX IMAGES

5      La présente invention concerne un procédé d'estimation du mouvement entre deux images numériques.

10      Le mouvement entre deux images successives,  $I_1$  et  $I_2$ , se définit généralement sous la forme d'un champ de mouvement associé à l'une ou l'autre des images  $I_1$ ,  $I_2$  et constitué de vecteurs déplacement se rapportant chacun à un point de l'image concernée. Le vecteur déplacement est un vecteur à deux dimensions représentatif de la différence de position entre le  
15      pixel de l'image  $I_1$  et le pixel associé de l'image  $I_2$  se rapportant au même point physique de la scène filmée.

20      Une estimation de mouvement est utile dans les domaines du traitement de l'image nécessitant la connaissance des mouvements ou des disparités entre deux images. On peut citer, à titre d'exemples, les domaines d'applications suivants:

- 25      - le codage vidéo : le champ de mouvement défini à partir d'images déjà décodées est alors utilisé pour la prédiction de l'image suivante;
- l'imagerie médicale : le procédé d'estimation du mouvement entre deux images est utilisé pour faire une analyse de mouvement du coeur par exemple;
- 30      - la télésurveillance : le procédé peut servir au contrôle du trafic routier;

- la reconstruction tridimensionnelle à partir d'images multi-vues : le procédé est utilisé pour estimer les disparités entre les différentes vues.

5 Pour obtenir un tel champ de mouvement, il est connu de décomposer l'image en éléments finis. Ces éléments finis qui peuvent être par exemple des triangles ou des quadrangles, sont déterminés par un maillage dont les noeuds correspondent aux sommets des éléments finis. Un  
10 vecteur déplacement est calculé pour chaque noeud du maillage. Puis, par le biais d'une fonction d'interpolation, on peut en déduire un vecteur déplacement pour chaque point de l'image considérée. Le champ de mouvement est ainsi déterminé par un modèle  
15 d'éléments finis, définissant le maillage utilisé pour partitionner l'image en éléments finis et la fonction d'interpolation permettant de calculer le vecteur déplacement en tout point de l'image.

20 Le maillage utilisé peut être régulier ou non et doit être choisi suffisamment dense pour modéliser au mieux le mouvement entre les deux images sans toutefois nécessiter une quantité de calculs ou de données à transmettre trop importante. Ce choix est effectué une  
25 fois pour toutes en début de procédé et ce maillage reste généralement le même tout au long de l'estimation.

Le calcul des vecteurs déplacement des noeuds du  
30 maillage peut être effectué selon diverses méthodes. Il existe tout d'abord les méthodes dites de mise en correspondance, ou "matching", consistant à tester un ensemble discret de valeurs possibles de vecteurs

déplacement pour chaque noeud du maillage et à retenir les meilleurs vecteurs selon un critère donné. Une seconde méthode dite par transformée consiste à utiliser les propriétés de la transformée de Fourier et de ses extensions afin de convertir le mouvement en un déphasage dans l'espace transformé. Enfin, il existe une troisième méthode dite différentielle permettant de déterminer les vecteurs déplacement par optimisation d'un critère mathématique (par exemple, une erreur quadratique entre l'image et sa valeur prédite avec le champ de mouvement). Cette méthode est la plus utilisée pour l'estimation de mouvement avec modélisation par éléments finis. Une méthode différentielle classique pour l'optimisation des vecteurs déplacement est la méthode de Gauss-Newton. La présente demande concerne plus particulièrement la famille de procédé d'estimation de mouvement utilisant un modèle d'éléments finis et une méthode différentielle pour déterminer le champ de mouvement.

20

Bien que très répandu, ce type de procédé présente cependant quelques inconvénients. Le maillage choisi en début de procédé peut se révéler inapproprié par rapport au contenu sémantique de l'image, certaines zones de l'image méritant un maillage plus dense et d'autres un maillage plus aéré. Par ailleurs, sous l'effet du champ des vecteurs déplacement des noeuds du maillage, le maillage initial sur l'image de départ, par exemple I2, se transforme en un nouveau maillage sur l'autre image, par exemple I1. Il peut alors se produire des situations pathologiques au niveau du nouveau maillage telles que :

30

- des retournements d'éléments finis: des éléments finis se retournent et viennent en recouvrir d'autres, détruisant ainsi la propriété de partition du domaine de l'image que doit vérifier tout maillage,

5 - débordement des noeuds périphériques du maillage déplacé après application des vecteurs déplacement au-delà du domaine de l'image I1: certains pixels de l'image I2 peuvent être associés à des pixels de l'image I1 situés en dehors du domaine de l'image I1.

10 Ceci n'est pas forcément gênant mais il peut être intéressant de forcer les noeuds périphériques du maillage déplacé à rester dans le domaine de l'image I1.

15 Un but de l'invention est de proposer un procédé d'estimation de mouvement dans lequel le maillage est optimisé au cours de l'estimation de manière à obtenir en fin de procédé un maillage adapté au contenu sémantique des images. A cet effet, on prévoit un

20 affinage local des éléments finis durant l'estimation de mouvement.

Un autre but de l'invention est d'améliorer l'efficacité de la méthode de Gauss Newton pour

25 l'optimisation des vecteurs déplacement des noeuds du maillage. A cet effet, on prévoit d'effectuer cette optimisation sur plusieurs niveaux de résolution des images.

30 Enfin, un autre but de l'invention est de proposer un procédé d'estimation de mouvement permettant d'éviter les situations pathologiques précitées. A cet effet, on prévoit selon l'invention de rajouter, au cours de



l'étape d'optimisation des vecteurs déplacement, des contraintes pour éviter de telles situations.

5 Aussi, l'invention a pour objet un procédé d'estimation du mouvement entre deux images numériques,  $I_1$  et  $I_2$ , de luminance  $Y_1$  et  $Y_2$ , destiné à générer, pour chaque point de coordonnées  $x, y$  de l'image  $I_2$  un vecteur déplacement  $\vec{d}(x, y) = (d_x, d_y)$  de manière à former une image  $\hat{I}_2$  à partir de l'image  $I_1$ , de luminance  $\hat{Y}_2(x, y) = Y_1(x - d_x, y - d_y)$ ,  
10 qui soit une approximation de l'image  $I_2$ , caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes:

(a) - définir un modèle d'éléments finis initial comportant un maillage dont les noeuds sont des points de l'image  $I_2$ , un vecteur déplacement à chaque noeud  
15 dudit maillage, et une formule d'interpolation pour calculer la valeur du vecteur déplacement de chaque point de l'image  $I_2$  à partir des valeurs des vecteurs déplacements des noeuds de la maille à laquelle il appartient,

20 (b) - optimiser la valeur des vecteurs déplacement du modèle selon une méthode différentielle,

(c) - calculer un écart  $E$  entre l'image  $\hat{I}_2$  et l'image  $I_2$  pour chaque élément fini ou maille,

25 (d) - opérer un maillage plus fin sur une fraction discrète de l'ensemble des éléments finis déterminée selon un critère relatif aux écarts  $E$ , et attribuer un vecteur déplacement à chaque nouveau noeud de maillage,

(e) - répéter les étapes (b), (c) et (d) sur le modèle d'éléments finis obtenu au terme de l'étape (d)  
30 précédente, jusqu'à satisfaire un critère d'arrêt.

Selon un mode de réalisation amélioré, on définit en outre, pour chaque image numérique  $I_1$  et  $I_2$ , un ensemble de  $R$  images  $I_i^r$  de niveau de résolution  $r$  et de luminance  $Y_i^r$  avec  $r$  prenant les valeurs  $(0, \dots, R-1)$  et  $i$  les valeurs 1 et 2, les images  $I_1^0$  et  $I_2^0$  correspondant aux images numériques  $I_1$  et  $I_2$ , et on effectue les étapes (b) à (e) pour chaque niveau de résolution  $r$ , à partir du niveau  $r=R-1$  jusqu'au niveau  $r=0$ .

Enfin, selon un mode de réalisation préféré, on prévoit rajouter des contraintes sur le déplacement des éléments finis au moment de l'optimisation des vecteurs déplacement de manière à éviter le retournement des éléments finis. Selon un autre mode de réalisation, on prévoit également d'introduire des contraintes pour éviter le débordement du maillage obtenu après application des vecteurs déplacement au-delà du domaine de l'image  $I_1$ .

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée qui suit et qui est faite en référence aux dessins annexés, dans lesquels:

- la figure 1 représente un schéma d'un premier mode de réalisation du procédé d'estimation de mouvement selon l'invention;

- la figure 2 illustre l'étape (d) du procédé de l'invention; et

- la figure 3 représente un schéma d'un mode de réalisation amélioré du procédé d'estimation de mouvement selon l'invention.

On considère deux images numériques  $I_1$  et  $I_2$  de luminance respective  $Y_1$  et  $Y_2$ . Le procédé de l'invention consiste à générer, pour chaque point  $P$  de coordonnées  $(x,y)$  dans l'image  $I_2$ , un vecteur déplacement  $\vec{d}(x,y)=(d_x,d_y)$ . Ce vecteur est défini comme étant le vecteur permettant de construire à partir de l'image  $I_1$ , une image  $\hat{I}_2$  de luminance  $\hat{Y}_2(x,y)=Y_1(x-d_x,y-d_y)$  qui soit une approximation de  $I_2$ . Les déplacements sont ainsi définis de l'image  $I_1$  vers l'image  $I_2$ .

Le champ de mouvement recherché est défini par un modèle d'éléments finis. Dans la suite de l'exposé, on considère que les éléments finis sont des triangles sans qu'on puisse y voir une limitation de la portée de la présente demande à cette forme d'éléments finis. Le modèle d'éléments finis comporte par conséquent un maillage triangulaire, des vecteurs déplacement définis aux noeuds du maillage, lesquels noeuds correspondant aux sommets des triangles, et une formule d'interpolation pour calculer le vecteur déplacement des points à l'intérieur des triangles.

La formule d'interpolation utilisée pour calculer le champ de mouvement en tout point du domaine de l'image  $I_2$  est la suivante:

si on considère le point  $P$  de coordonnées  $(x,y)$  dans l'image  $I_2$  appartenant au triangle  $e$  de sommets  $P_1$ ,  $P_j$  et  $P_k$  de coordonnées respectives  $(x_i,y_i)$ ,  $(x_j,y_j)$  et  $(x_k,y_k)$ , son vecteur déplacement est égal à

$$\vec{d}(x,y) = \sum_{l=i,j,k} \psi_l^e(x,y) \cdot \vec{d}(x_l,y_l)$$

où  $\psi_l^e$  représente une fonction de base associée au triangle  $e$ .

Dans le cas d'une interpolation affine, les  $\psi_l^e(x,y)$  représentent les coordonnées barycentriques du point P dans le triangle e de sommets  $P_1, P_j, P_k$ . Ces fonctions sont définies par la relation suivante :

$$5 \quad \begin{cases} \psi_l^e(x,y) = \alpha_l + \beta_l x + \gamma_l y & (x,y) \in e \\ \sum_{l=i,j,k} \psi_l^e(x,y) = 1 & \text{et } \alpha_l, \beta_l, \gamma_l \in \mathcal{R} \\ \psi_l^e(x,y) = 0 & (x,y) \notin e \end{cases}$$

$$\text{soit } \psi_i^e(x,y) = \frac{x_j y_k - x_k y_j + (y_j - y_k)x + (x_k - x_j)y}{x_j y_k - x_k y_j + x_k y_i - x_i y_k + x_i y_j - x_j y_k}$$

Les fonctions affines  $\psi_j^e(x,y)$  et  $\psi_k^e(x,y)$  se déduisent de la fonction  $\psi_i^e(x,y)$  en permutant circulairement les indices i,j,k. On peut également utiliser des modèles d'éléments finis plus évolués, les fonctions  $\psi$  pouvant  
10 alors être étendues à des polynômes de degré  $n \geq 2$  mais la formule d'interpolation des vecteurs déplacement fait alors intervenir des dérivées premières, secondes... Un choix divers de modèles d'éléments finis  
15 est proposé dans l'ouvrage "Handbook of Numerical Analysis" de P.G Ciarlet et J.L Lions, Volume 2, pp 59-99, Ed. North Holland.

Selon l'invention, au fur et à mesure de l'estimation  
20 de mouvement, on optimise la valeur des vecteurs déplacement des noeuds du maillage appelés vecteurs nodaux, et on densifie localement le maillage lorsque c'est nécessaire. Avantageusement, cette optimisation sera effectuée sur plusieurs niveaux de résolution en  
25 partant d'un niveau de résolution faible.

Selon un premier mode de réalisation illustré par la figure 1, le procédé de l'invention comporte cinq étapes référencées (a) à (e).

5 Selon l'étape (a), on définit un modèle d'éléments finis initial en sélectionnant des points de l'image  $I_2$  selon un maillage triangulaire initial. Les noeuds du maillage représentent les sommets des triangles (éléments finis) du modèle. Ce maillage peut être  
10 défini de manière quelconque, par exemple en fonction des besoins de l'application ou de connaissances préalables ou du mouvement déjà calculé entre deux images précédentes de la même séquence vidéo. Si aucune donnée concernant le maillage initial n'est spécifiée,  
15 on utilise un maillage régulier en quinconce. Les mailles sont alors des triangles. Un vecteur déplacement de valeur nulle est alors associé à chaque noeud du maillage. La formule d'interpolation définie précédemment est également une donnée du modèle  
20 initial.

Selon l'étape (b), on optimise la valeur des vecteurs déplacement du modèle selon une méthode différentielle, par exemple la méthode de Gauss-Newton ou son extension  
25 de Marquardt. Cette optimisation peut être soit libre, c'est-à-dire sans contraintes imposées sur les valeurs possibles des vecteurs nodaux, soit avec contraintes. Les vecteurs nodaux désignent les vecteurs déplacement des noeuds du maillage. L'optimisation avec contraintes  
30 est directement liée à l'optimisation libre et fait l'objet d'un mode de réalisation développé plus loin.

La technique d'optimisation libre employée ici exploite les caractéristiques intéressantes de la méthode de Gauss-Newton (convergence rapide de l'optimum) et de la méthode du gradient avec pas adaptatif (convergence globale vers un optimum local) pour résoudre le système linéaire à suivre. Cette technique est une correction itérative des vecteurs déplacement  $\vec{d}(x,y)$  permettant d'obtenir dès le départ une approximation grossière du mouvement. Le nombre d'itérations  $k$  pour cette optimisation des vecteurs déplacement est soit spécifié par l'utilisateur en début de procédé, soit fonction d'un seuil lié à la variation maximale entre deux valeurs consécutives de vecteurs nodaux pour deux itérations successives. Nous développons ci-après l'extension Marquardt de la méthode d'optimisation de Gauss Newton.

L'expression des corrections  $\delta D^{k+1}$  à l'itération  $k+1$  des vecteurs déplacement selon cette méthode est donnée par le système linéaire suivant:

$$D^{k+1} = D^k - \left[ R^k + \alpha \cdot I_{2N} \right]^{-1} \cdot \nabla E^k \Leftrightarrow -H \delta D^{k+1} = \nabla E^k \quad (1)$$

avec :

- $D^{k+1}$  une matrice colonne de  $2N$  éléments comprenant les composantes  $d_x$  et  $d_y$  des vecteurs nodaux à l'itération  $k+1$ ,  $N$  étant le nombre de noeuds du maillage à l'étape courante;

- $D^k$  une matrice colonne de  $2N$  éléments comprenant les composantes  $d_x$  et  $d_y$  des vecteurs nodaux à l'itération  $k$ ;

- $H = \left[ R^k + \alpha \cdot I_{2N} \right]$

-  $I_{2N}$  la matrice identité de dimension  $2N$ ;

-  $\nabla E^k = \begin{pmatrix} \nabla_x E^k \\ \nabla_y E^k \end{pmatrix}$  matrice colonne de  $2N$  éléments dont  
 $N$  éléments  $\nabla_{x,n} E^k$  et  $N$  éléments  $\nabla_{y,n} E^k$ ,  $n$   
désignant un noeud du maillage et  
prenant tour à tour les valeurs  $(1 \dots N)$ ;  
avec

$$\nabla_{x,n} E^k = 2. \sum_{e \in \text{supp}(n)} \sum_{(x,y) \in e} \text{DFD}_k(x,y) \cdot \frac{\partial I_1(x-d_x, y-d_y)}{\partial x} \cdot \psi_n^e(x,y)$$

$$\nabla_{y,n} E^k = 2. \sum_{e \in \text{supp}(n)} \sum_{(x,y) \in e} \text{DFD}_k(x,y) \cdot \frac{\partial I_1(x-d_x, y-d_y)}{\partial y} \cdot \psi_n^e(x,y)$$

où  $\text{DFD}_k(x,y) = Y_2(x,y) - Y_1(x-d_x, y-d_y)$  à l'itération  $k$

où  $\text{supp}(n)$  représente le support de la fonction de  
base  $\psi_n^e(x,y)$  attachée au noeud  $n$ , c'est-à-dire  
l'ensemble des triangles ayant le noeud  $n$  pour  
sommet;

-  $R^k = \begin{pmatrix} R^{k,xx} & R^{k,xy} \\ R^{k,yx} & R^{k,yy} \end{pmatrix}$  une matrice carrée de dimension  $2N$

$$\text{où } R_{mn}^{k,xx} = 2. \sum_{e \in \text{supp}(mn)} \sum_{(x,y) \in e} \left( \frac{\partial I_1(x-d_x, y-d_y)}{\partial x} \right)^2 \cdot \psi_m^e(x,y) \cdot \psi_n^e(x,y)$$

$$R_{mn}^{k,yx} = 2. \sum_{e \in \text{supp}(mn)} \sum_{(x,y) \in e} \left( \frac{\partial I_1(x-d_x, y-d_y)}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial I_1(x-d_x, y-d_y)}{\partial y} \right) \cdot \psi_m^e(x,y) \cdot \psi_n^e(x,y)$$

$$R_{mn}^{k,yx} = R_{mn}^{k,xy}$$

$$R_{mn}^{k,yy} = 2. \sum_{c \in \text{supp}(mn)} \sum_{(x,y) \in c} \left( \frac{\partial I_1(x-d_x, y-d_y)}{\partial y} \right)^2 \cdot \psi_m^c(x,y) \cdot \psi_n^c(x,y)$$

où  $m$  et  $n$  désignent des noeuds du maillage et prennent tour à tour les valeurs  $(1 \dots N)$  et où  $\text{supp}(nm) = \text{supp}(n) \cap \text{supp}(m)$ .

5     -  $\alpha = \max_n (|\nabla_n E^k| \cdot \|\psi_n\|)$

où  $\|\psi_n\|$  est une norme fonctionnelle de  $\psi_n$ . Les deux normes les plus intéressantes sont:

$$\|\psi_n\| = \sup_{(x,y) \in \text{supp}(n)} |\psi_n(x,y)| = 1 \quad \text{ou}$$

$$\|\psi_n\| = \sqrt{\frac{1}{|\text{supp}(n)|} \sum_{(x,y) \in \text{supp}(n)} [\psi_n(x,y)]^2}$$

10      $|\text{supp}(n)|$  désigne le cardinal de la région discrète  $\text{supp}(n)$ .

A la fin de cette phase d'optimisation, on dispose de  $N$  vecteurs nodaux se rapportant chacun à un noeud du maillage.

15

Selon un mode de réalisation en variante du gradient adaptatif, on peut également envisager d'utiliser une technique de décomposition dite "LDL<sup>t</sup> profil" en langage technique pour résoudre le système linéaire (1) et accélérer le traitement. Cette technique est décrite dans l'ouvrage intitulé "Analyse numérique matricielle appliquée à l'art de l'ingénieur" de Théodore Lascaux, Tome 1, pp 295-299, Ed. Masson, 1986.

20

25     Selon une caractéristique importante de l'invention, le maillage est ensuite affiné localement par division des triangles lorsque l'écart entre l'image  $\hat{I}_2$  et l'image



$I_2$  sur ces triangles est trop élevé. C'est pourquoi, selon l'étape (c) du procédé, on calcule un écart  $E$  entre l'image  $\hat{I}_2$  et l'image  $I_2$  pour chaque triangle  $e$ . L'écart  $E$  est défini de la manière suivante

$$E = \sum_{(x,y) \in e} DFD^2(x,y)$$

avec  $DFD(x,y) = Y_2(x,y) - Y_1(x-d_x, y-d_y)$

Bien entendu, pour calculer cet écart pour chaque triangle, il faut avoir préalablement calculé la valeur des vecteurs déplacement de tous les points de l'image  $I_2$  par interpolation à partir des vecteurs nodaux obtenus au terme de l'étape (b).

Ensuite, conformément à l'étape (d), on affine le maillage sur une fraction discrète de l'ensemble des triangles du modèle. Cette fraction est déterminée selon un critère relatif aux écarts  $E$  calculés précédemment à l'étape (c). Pour opérer cet affinage, on peut par exemple classer les triangles du modèle par ordre décroissant de leurs écarts  $E$  et subdiviser les  $X$  premiers triangles de ce classement en triangles de taille inférieure.  $X$  est une fraction prédéterminée du nombre d'éléments finis dans le modèle, par exemple la moitié.

Pour affiner localement le maillage, on peut également prévoir de comparer l'ensemble des écarts  $E$  calculés à l'étape (c) à un écart seuil qui est fonction de la taille de l'élément fini considéré, et de subdiviser en éléments finis de taille inférieure les éléments finis dont les écarts  $E$  sont supérieurs à l'écart seuil.

La subdivision d'un triangle  $e$  en quatre triangles de  
 taille inférieure est illustré à la figure 2. Le  
 triangle  $e$  est défini par les trois sommets  $P_1$ ,  $P_2$  et  
 5  $P_3$  ayant pour vecteurs déplacement respectifs  $\bar{d}_1$ ,  $\bar{d}_2$ ,  
 $\bar{d}_3$ . Pour le subdiviser en quatre, on définit trois  
 nouveaux noeuds  $P_4$ ,  $P_5$  et  $P_6$  au milieu des trois côtés  
 $P_1P_3$ ,  $P_1P_2$ ,  $P_2P_3$  du triangle. On attribue à chacun de  
 ces trois nouveaux noeuds un vecteur déplacement égal à  
 10 la moyenne des vecteurs déplacement des deux sommets du  
 côté auquel il appartient, respectivement  $(\bar{d}_1 + \bar{d}_3)/2$ ,  
 $(\bar{d}_1 + \bar{d}_2)/2$ ,  $(\bar{d}_2 + \bar{d}_3)/2$ . Les triangles adjacents au  
 triangle  $e$  ayant pour côté  $P_1P_2$ ,  $P_2P_3$  ou  $P_1P_3$  sont alors  
 eux-mêmes subdivisés en deux ou trois.

15

On obtient ainsi un modèle d'éléments finis dont le  
 maillage a été affiné localement. Selon l'étape (e), on  
 répète ensuite les étapes (b), (c) et (d) en prenant  
 comme modèle à optimiser le modèle obtenu au terme de  
 20 l'étape (d) précédente. Et, on répète cette succession  
 d'étapes jusqu'à satisfaire un critère d'arrêt. Ce  
 critère d'arrêt est par exemple un nombre prédéterminé  
 d'éléments finis à atteindre au terme de l'étape (d).

25

On peut également prévoir d'arrêter le procédé lorsque  
 les écarts  $E$  de l'ensemble des éléments finis du modèle  
 obtenu au terme de l'étape (c) précédente sont  
 inférieurs à un écart seuil.

30

Selon un mode de réalisation amélioré illustré figure  
 3, on effectue les étapes (b) à (e) en s'appuyant sur  
 plusieurs niveaux de résolution d'images  $I_1$  et  $I_2$ .  
 Cette variante a pour but d'améliorer et d'accélérer la

convergence des calculs des vecteurs déplacement. Pour ce faire, on définit tout d'abord pour chaque couple d'images numériques  $I_1$  et  $I_2$ , un ensemble de  $R$  images  $I_i^r$  de niveau de résolution  $r$  et de luminance  $Y_i^r$ ,  $r$  prenant tour à tour les valeurs  $(R-1, R-2, \dots, 0)$  et  $i$  les valeurs  $(1, 2)$  puis on effectue les étapes (b) à (e) pour chaque niveau de résolution  $r$ , à partir du niveau de résolution  $r=R-1$  jusqu'au niveau  $r=0$ . A noter que les images  $I_1^0$  et  $I_2^0$  correspondent aux images numériques  $I_1$  et  $I_2$ .

En pratique, les images  $I_i^r$  sont obtenues par filtrage de l'image  $I_i$  au moyen d'un filtre passe-bas linéaire ne laissant passer que  $1/2^r$  de la bande spectrale de l'image considérée dans les directions  $x$  et  $y$ , c'est-à-dire un filtre de réponse impulsionnelle  $h_n^r$  ayant une bande passante  $BP_r = [-1/2^{r+1}, 1/2^{r+1}]$  dans l'espace des fréquences normalisées  $[-1/2, 1/2]$ . L'image  $I_i^r$  est définie par la relation suivante:

$$Y_i^r(x, y) = \sum_{u=-M}^M \sum_{v=-M}^M Y_i(x-u, y-v) h_u^r h_v^r$$

Le filtre utilisé est par exemple une approximation d'un filtre idéal et sa réponse impulsionnelle est définie de la manière suivante:

$$h_n^r = \frac{s_n^r}{S} \quad \text{avec} \quad S = \sum_{n=-M}^M s_n^r \quad -M \leq n \leq M$$

$$\text{et} \quad s_n^r = 2B \cdot \text{sinc}(2\pi B_r n) = 2B \frac{\sin 2\pi B_r n}{2\pi B_r n}$$

$$B_r = \frac{1}{2^{r+1}}$$

où  $B$  et  $M$  sont des entiers naturels  
 $M = +\infty$  dans le cas idéal.

Comme indiqué précédemment, cette optimisation sur plusieurs niveaux de résolution permet d'améliorer et d'accélérer la convergence des calculs des vecteurs déplacement. A noter que le nombre de niveaux de  
 5 résolution R choisi peut différer du nombre d'affinages successifs effectués sur le maillage.

Selon un mode de réalisation préféré, on propose de  
 10 rajouter des contraintes de compacité sur chaque triangle du modèle de manière à empêcher le retournement des triangles.

La compacité d'un triangle de sommets  $P_i, P_j, P_k$  est  
 15 définie par la relation suivante:

$$C(P_i, P_j, P_k) = \frac{4 * \pi * S(P_i, P_j, P_k)}{P^2(P_i, P_j, P_k)}$$

avec  $C(P_i, P_j, P_k) \in ]0, 1[$ ; et

$S(P_i, P_j, P_k)$  et  $P(P_i, P_j, P_k)$  représentant

respectivement la surface et la périmètre du  
 20 triangle  $(P_i, P_j, P_k)$ ;

Si on empêche la compacité d'un triangle de tendre vers zéro, on l'empêche ainsi de se retourner. C'est pourquoi, pour éviter les retournements de triangles,  
 25 chaque triangle doit vérifier la contrainte suivante :

$$C(P_i + \bar{d}_{P_i}, P_j + \bar{d}_{P_j}, P_k + \bar{d}_{P_k}) \geq K * C(P_i, P_j, P_k)$$

$$\Leftrightarrow K * C(P_i, P_j, P_k) - C(P_i + \bar{d}_{P_i}, P_j + \bar{d}_{P_j}, P_k + \bar{d}_{P_k}) \leq 0$$

$$\Leftrightarrow g_e(\bar{D}) \leq 0; e = \text{triangle}(P_i, P_j, P_k)$$

où  $K$  est un paramètre fixant la variation de compacité autorisée et  $\bar{D}$  est le vecteur colonne des vecteurs déplacement des noeuds du modèle.

5

Selon l'invention, on associe une telle contrainte à chaque triangle au moment de l'optimisation des vecteurs déplacement. L'étape d'optimisation des vecteurs déplacement revient à un système du type:

$$10 \quad \begin{cases} \min_{\bar{D}} E(\bar{D}) \\ g_e(\bar{D}) \leq 0 \quad \forall e \in I \\ \bar{D} \in \mathcal{R}^{2N} \end{cases}$$

où  $-E(\bar{D})$  représente l'écart entre l'image  $I_2$  et l'image prédite  $\hat{I}_2$ ;

- $g_e$  est une contrainte liée au triangle  $e$ ;
- $I$  est l'ensemble des triangles du maillage.

15 Pour résoudre les problèmes d'optimisation sous contraintes, on prévoit d'utiliser la technique dite du Lagrangien augmenté. Cette technique est décrite dans l'ouvrage intitulé "Théories et algorithmes" de Michel Minoux, Tome 1, pp 257-260, Dunod 1983. Cette

20 technique combine deux techniques d'optimisation: l'optimisation Lagrangienne et l'optimisation de pénalités extérieures.

25 Selon cette technique, résoudre le système précédent revient à résoudre le système sans contraintes suivant:

$$\min_{\bar{D}} \left( E(\bar{D}) + \sum_{e \in I} G(g_e(\bar{D}), \lambda_e, r_e) \right)$$

où  $r_e$  est un élément de pénalité,  
 $\lambda_e$  est un multiplicateur de Lagrange

$G$  est un Lagrangien augmenté déterminé par la relation:

$$G(g_e(\bar{D}), \lambda_e, r_e) = \begin{cases} \lambda_e g_e(\bar{D}) + r_e g_e(\bar{D}) & \text{si } r_e > 0 \text{ et } g_e(\bar{D}) \geq 0 \\ \lambda_e g_e(\bar{D}) & \text{si } r_e = 0 \text{ et } g_e(\bar{D}) \geq 0 \\ 0 & \text{si } g_e(\bar{D}) \leq 0 \end{cases}$$

Les contraintes  $g_e$  ont été préalablement linéarisées  
5 par la formule de Taylor à l'ordre 1 :

$$g_e(\bar{D}) \approx g_e(P_i, P_j, P_k) + \sum_{P_l = P_i, P_j, P_k} \bar{d}_{P_l} \frac{\partial g_e}{\partial \bar{d}_{(P_i, P_j, P_k)}}(P_l) \quad ..$$

La méthode d'optimisation est alors la suivante:

- on initialise  $k=0$
- 10 - on pose  $\lambda = 0$  et  $r=0$ ,  $\lambda \in \mathcal{N}^m$  et  $r \in \mathcal{N}^m$ , et  $m$  désigne le nombre de triangles du modèle
- on détermine ensuite le minimum  $\delta D^{k+1}(\lambda, r)$  tel que, à l'itération  $k+1$ ,

$$-H \delta D^{k+1} = \nabla E^k - C^t \gamma$$

- 15 où  $\gamma^t = (\lambda, r)$ ,  $C^t$  est une matrice de  $\mathcal{N}^{2N} \times \mathcal{N}^{2m}$   
 $C^t \gamma$  forme une matrice des contraintes linéarisées  
 ayant pour coefficients les valeurs suivantes:

$$C_{i,l} = \begin{cases} \begin{cases} 0 & \text{si } P_l = P_i, P_j \text{ ou } P_k \\ \partial_{\bar{d}_{P_l}} g_e(P_i, P_j, P_k) & \text{sinon} \end{cases} & \text{si } g_e(\bar{D}) \leq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

où  $e$  représente le triangle de sommets  $P_i, P_j, P_k$ .

20

Puis, on effectue la mise à jour de  $\lambda$  par l'algorithme d'Uzawa et on augmente  $r$  puis on répète l'opération précédente jusqu'à ce que toutes les contraintes soient vérifiées. On passe ensuite à l'itération  $k+2$ . A noter  
25 que l'algorithme d'Uzawa est développé en détail dans

l'ouvrage intitulé "Théories et algorithmes" de Michel Minoux, Tome 1, Dunod 1983.

- 5 Selon un dernier mode de réalisation, on peut également prévoir d'introduire des contraintes pour éviter le débordement du maillage obtenu après application des vecteurs déplacement au-delà du domaine de l'image I1. Ce mode consiste à forcer les noeuds périphériques du maillage à rester sur les bords de l'image après application des vecteurs déplacement. Pour cela, les
- 10 composantes abscisses  $\delta D^{k+1}$  pour les noeuds périphériques sur les bords gauche et droit de l'image I2 sont annulées à chaque itération k. De même, les composantes ordonnées  $\delta D^{k+1}$  pour les bords haut et bas
- 15 de l'image I2 sont annulées à chaque itération k.

## REVENDECATIONS

1. Procédé d'estimation du mouvement entre deux  
5 images numériques,  $I_1$  et  $I_2$ , de luminance  $Y_1$  et  $Y_2$ ,  
destiné à générer, pour chaque point de coordonnées  $x, y$   
de l'image  $I_2$  un vecteur déplacement  $\vec{d}(x, y) = (d_x, d_y)$  de  
manière à former une image  $\hat{I}_2$  à partir de l'image  $I_1$ ,  
de luminance  $\hat{Y}_2(x, y) = Y_1(x - d_x, y - d_y)$ , qui soit une  
10 approximation de l'image  $I_2$ ,  
caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes:

(a) - définir un modèle d'éléments finis initial  
comportant un maillage dont les noeuds sont des points  
de l'image  $I_2$ , un vecteur déplacement à chaque noeud  
15 dudit maillage, et une formule d'interpolation pour  
calculer la valeur du vecteur déplacement de chaque  
point de l'image  $I_2$  à partir des valeurs des vecteurs  
déplacements des noeuds de la maille à laquelle il  
appartient,

20 (b) - optimiser la valeur des vecteurs déplacement du  
modèle selon une méthode différentielle,

(c) - calculer un écart  $E$  entre l'image  $\hat{I}_2$  et l'image  
 $I_2$  pour chaque élément fini ou maille,

25 (d) - opérer un maillage plus fin sur une fraction  
discrète de l'ensemble des éléments finis déterminée  
selon un critère relatif aux écarts  $E$ , et attribuer un  
vecteur déplacement à chaque nouveau noeud de maillage,

(e) - répéter les étapes (b), (c) et (d) sur le modèle  
d'éléments finis obtenu au terme de l'étape (d)  
30 précédente, jusqu'à satisfaire un critère d'arrêt.



2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que, pour opérer un maillage plus fin sur une fraction discrète de l'ensemble des éléments finis à l'étape (d), on classe ledit ensemble des éléments finis par ordre décroissant de leurs écarts E et on subdivise les X premiers éléments finis de ce classement en éléments finis de taille inférieure, X représentant une fraction prédéterminée du nombre des éléments finis de l'ensemble.

3. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que, pour opérer un maillage plus fin sur une fraction discrète de l'ensemble des éléments finis à l'étape (d), on compare l'ensemble des écarts E calculés à l'étape (c) à un écart seuil qui est fonction de la taille de l'élément fini considéré, et on subdivise en éléments finis de taille inférieure les éléments finis dont les écarts E sont supérieurs à l'écart seuil.

4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que ledit critère d'arrêt est un nombre prédéterminé d'éléments finis constituant le modèle d'éléments finis, à atteindre au terme de l'étape (d).

5. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que ledit critère d'arrêt de l'étape (e) est satisfait lorsque les écarts E de l'ensemble des éléments finis du modèle obtenu au terme de l'étape (d) précédente sont inférieurs à un écart seuil fonction de la taille de l'éléments fini considéré.

6. Procédé selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce qu'on définit en outre, pour chaque image numérique  $I_1$  et  $I_2$ , un ensemble de  $R$  images  $I_i^r$  de niveau de résolution  $r$  et de luminance  $Y_i^r$  avec  $r$  prenant les valeurs  $(0, \dots, R-1)$  et  $i$  les valeurs 1 et 2, les images  $I_1^0$  et  $I_2^0$  correspondant aux images numériques  $I_1$  et  $I_2$ , et en ce qu'on effectue les étapes (b) à (e) pour chaque niveau de résolution  $r$ , à partir du niveau  $r=R-1$  jusqu'au niveau  $r=0$ .

7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce que les ensembles de  $R$  images de niveau de résolution  $r$  sont obtenus par filtrage des images  $I_1$  et  $I_2$  suivant les deux directions  $x$  et  $y$  au moyen d'un filtre passe-bas de réponse impulsionnelle  $h_n^r$ , chaque image  $I_i^r$  étant définie par la relation suivante:

$$Y_i^r(x, y) = \sum_{u=-M}^M \sum_{v=-M}^M Y_i(x-u, y-v) h_u^r h_v^r$$

avec  $M$  entier naturel.

8. Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce que la réponse impulsionnelle  $h_n^r$  est définie de la manière suivante:

$$h_n^r = \frac{s_n^r}{S} \quad \text{avec} \quad s_n^r = 2B \cdot \text{sinc}(2\pi B_r n) = 2B \frac{\sin 2\pi B_r n}{2\pi B_r n}$$

$$S = \sum_{n=-M}^M s_n^r$$

$$B_r = \frac{1}{2^{r+1}}$$

$B$  un entier naturel.

9. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les vecteurs déplacement initiaux sont des vecteurs nuls.

- 5 10. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'écart  $E$  entre l'image  $\hat{I}_2$  et l'image  $I_2$  pour chaque élément fini  $e$  est défini par la relation suivante:

$$E = \sum_{(x,y) \in e} DFD^2(x,y)$$

10 où  $DFD(x,y) = Y_2(x,y) - Y_1(x-d_x, y-d_y)$

- 15 11. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la formule d'interpolation pour calculer la valeur du vecteur déplacement d'un point  $P$  de coordonnées  $(x,y)$  dans l'image  $I_2$  appartenant à l'élément fini  $e$  de sommets  $P_1$ ,  $P_j$  et  $P_k$  de coordonnées respectives  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_j, y_j)$  et  $(x_k, y_k)$  est la suivante:

$$\bar{d}(x,y) = \sum_{l=i,j,k} \psi_l(x,y) \cdot \bar{d}(x_l, y_l)$$

où  $\psi_1$  est une fonction de la forme

20 
$$\begin{cases} \psi_l(x,y) = \alpha_l + \beta_l x + \gamma_l y & (x,y) \in e \\ \sum_{l=i,j,k} \psi_l(x,y) = 1 \\ \psi_l(x,y) = 0 & (x,y) \notin e \end{cases}$$

- 25 12. Procédé selon l'une des revendications 1 à 11, caractérisé en ce que la méthode différentielle d'optimisation des vecteurs déplacement est la méthode de Gauss-Newton.

13. Procédé selon l'une des revendications 1 à 11, caractérisé en ce que la méthode différentielle d'optimisation des vecteurs déplacement est l'extension de Marquardt de la méthode de Gauss-Newton.

14. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'une contrainte de compacité est imposée sur chaque élément fini au moment de l'optimisation des vecteurs déplacement du modèle d'éléments finis, ladite contrainte consistant à empêcher la compacité de chaque élément fini de tendre vers zéro.

15. Procédé selon la revendication 14, caractérisé en ce que la contrainte de compacité sur un élément fini e de sommets  $P_i, P_j, P_k$  et de compacité  $C(P_i, P_j, P_k)$  est définie par la relation suivante:

$$C(P_i + \bar{d}_{P_i}, P_j + \bar{d}_{P_j}, P_k + \bar{d}_{P_k}) \geq K * C(P_i, P_j, P_k)$$

où  $\bar{d}_{P_i}, \bar{d}_{P_j}$  et  $\bar{d}_{P_k}$  représentent les vecteurs déplacement des sommets  $P_i, P_j, P_k$  au cours de l'étape d'optimisation,

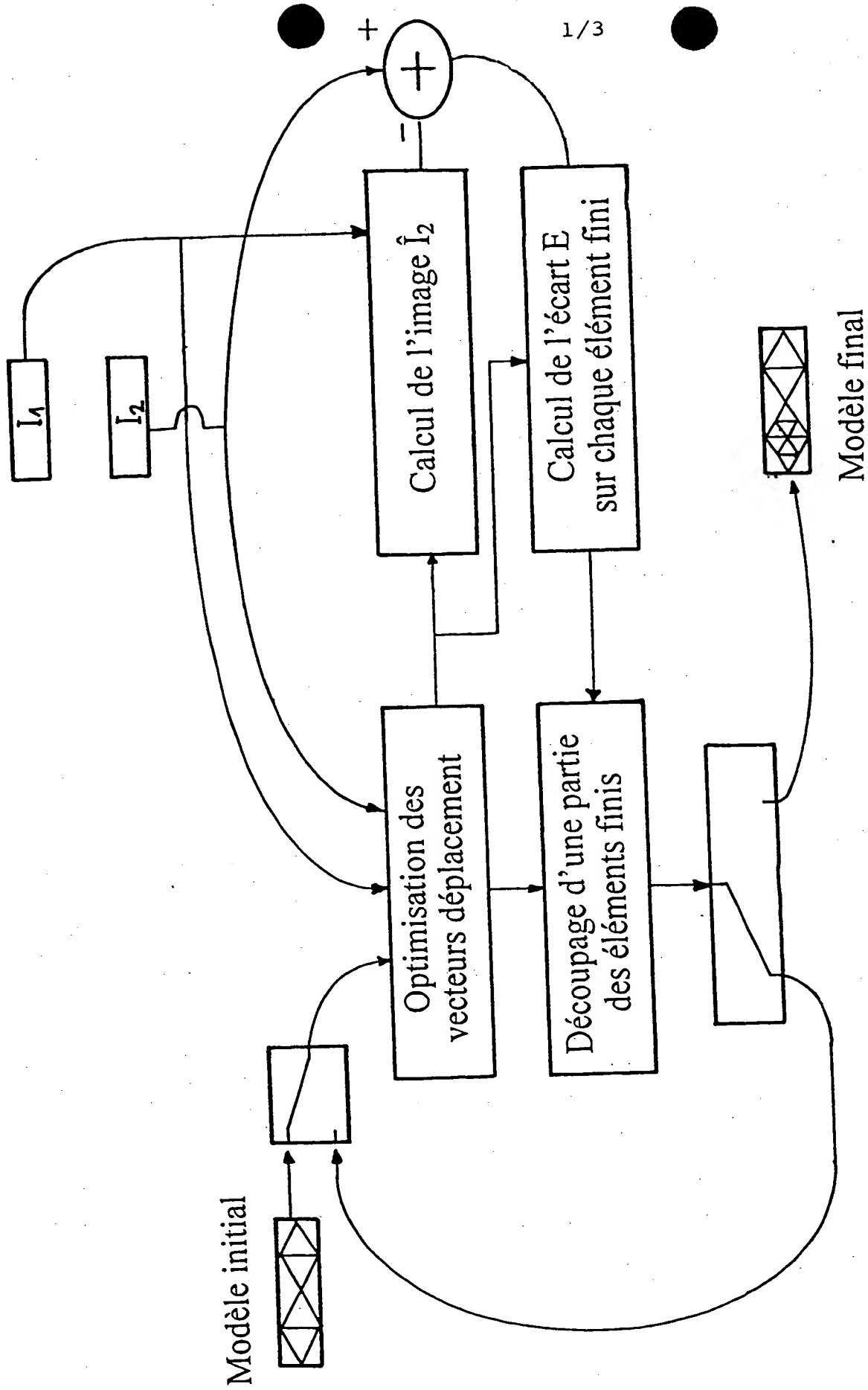
et K est un paramètre de compacité.

16. Procédé selon la revendication 14 ou 15, caractérisé en ce que l'optimisation des vecteurs déplacement sous contraintes sur les éléments finis est résolue par la technique dite du Lagrangien augmenté.

17. Procédé selon la revendication 16, caractérisé en ce que les contraintes sont employées sous une forme

linéarisée dans la technique dite du Lagrangien augmenté.

- 5 18. Procédé selon l'une des revendications 12, 13 ou 17, caractérisé en ce que les méthodes d'optimisation des vecteurs déplacement utilisent une technique  $LDL^t$  profil.

FIG.1

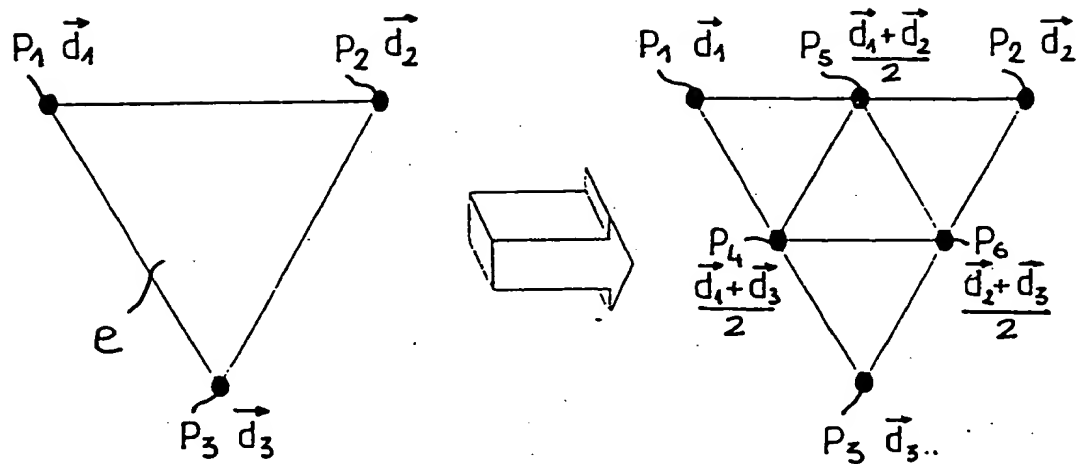
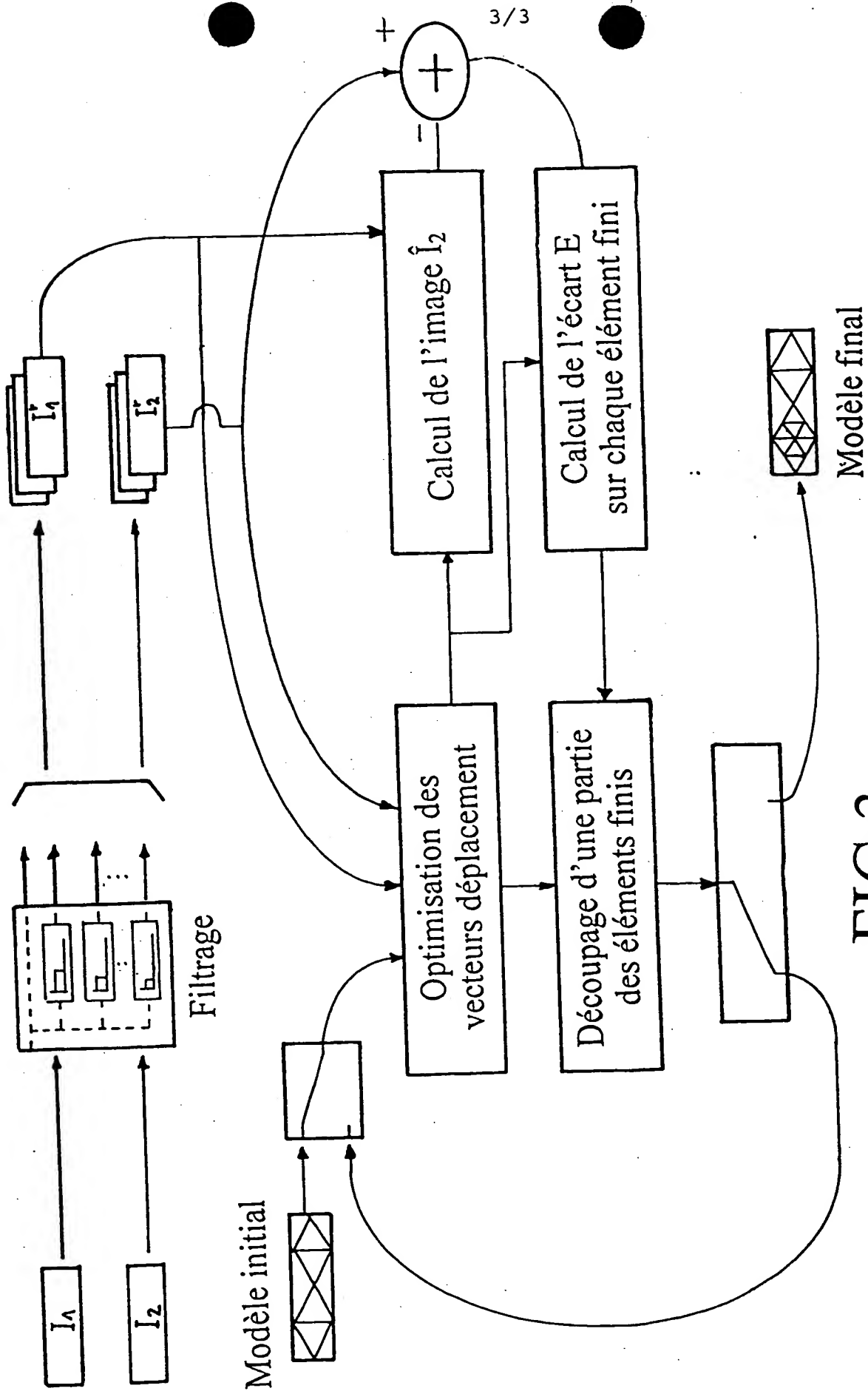


FIG.2



**FIG.3**